

# ZUR BERECHNUNG DER DRALLREGELUNG VON RADIALVENTILATOREN

Von

Z. VAJNA und F. BENCZE

Lehrstuhl für Strömungslehre der Technischen Universität, Budapest

(Eingegangen am 1. Juni 1960)

Vorgelegt von Prof. J. GRUBER

Im Betrieb der Radialventilatoren großer Leistung, in erster Reihe jener der Großkraftwerke, hat die Frage der wirtschaftlichsten Regelung eine große Bedeutung. Eine der verschiedenen bekannten Möglichkeiten ist die Drallregelung. Diese wurde am Lehrstuhl für Strömungslehre der Technischen Universität, Budapest in den letzteren Jahren untersucht. Bekanntlich wird hierbei die Leistung des Ventilators mit Hilfe eines vor dem Laufrad angeordneten axialen oder radialen Schaufelgitters geregelt. Die Verdrehung dieser Leitschaufeln kann der in das Laufrad eintretenden Strömung — je nach bedarf — einen Vor- oder ein Gegendrall erteilen. Aus der Eulerschen Turbinengleichung ist es unmittelbar zu ersehen, daß auf diese Weise die Gesamtdruckerhöhung des Laufrades, zugleich auch die Leistung der Maschine geregelt werden kann. Hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit steht diese Regelungsart zwischen der verlustlosen, stufenlosen Drehzahlregelung und der Drosselregelung [1]. Die Forschungsergebnisse [2] des Lehrstuhls hat die Praxis wiederholt verwendet und bestätigt.

Die Entwicklung jener theoretischen Verfahren, die in den letzten Jahren beim Bau von Radialventilatoren eine dauernd zunehmende Bedeutung gewannen, hat auch die Möglichkeit geschaffen, die Drallregelung theoretisch zu untersuchen. Es soll die Leistungsänderung eines gegebenen Laufrades — in einer mit den Versuchsergebnissen übereinstimmenden Weise — theoretisch ermittelt werden, falls der Drall der eintretenden Strömung geändert wird. Ferner soll zugleich die Änderung der betriebsmäßigen Geschwindigkeitsverteilung an den Schaufeln bei der Änderung des Dralls untersucht werden.

Mit Hilfe des theoretischen Verfahrens von HOFFMEISTER [3] kann die ideale Kennlinie, aber auch die Geschwindigkeitsverteilung an den Schaufeln auch im Falle eines bekannten Vordralles bestimmt werden. Voraussetzung dieses Verfahrens ist es, daß die Geschwindigkeit an der Stelle des Eintritts in das Schaufelgitter ihrer Größe und Richtung nach bekannt sei. Diese Geschwindigkeit kann man jedoch nur dann ermitteln, wenn die Strömung im Laufradeintritt eine Potentialströmung ist. Die Aufgabe besteht also vor

allem darin, eine beliebige, durch ein bekanntes Leitschaufelsystem erzeugte Drallströmung durch eine gleichwertige Potentialwirbelströmung zu ersetzen, mit der die theoretisch berechnete ideale Kennlinie und die experimentell bestimmte ideale Kennlinie — so gut als möglich — übereinstimmen.

Im ersten Abschnitt dieser Untersuchungen wurde die Geschwindigkeits- und Richtungsverteilung im Laufradeintritt bei verschiedenem Vordrall gemessen. Ein Ventilator saugte die Außenluft durch ein ruhendes radiales Schaufelgitter in ein Saugrohr ein. Durch verschiedene Einstellung der Leitschaufeln konnte der Drall im Saugrohr geändert werden. An einer geeigneten Versuchsanlage — die nachstehend noch näher beschrieben wird — wurde die Geschwindigkeitsverteilung an jener Stelle des Rohres gemessen, an welcher die Strömung eben der in das Laufrad eintretenden Strömung entspricht. Diese Messungen wurden bei vier verschiedenen Drallstärken bzw. Einstellungen der Leitschaufelstellungen wiederholt. Die Einstellwinkel waren  $\beta_L = 0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$  und  $60^\circ$ . Drallfreie Strömung ergab sich bei  $\beta_L = 0^\circ$ . Nicht einmal bei dieser Anordnung der Leitschaufeln konnte eine die Potentialströmung gut annähernde Strömung entstehen, wie das auf Grund der Mitteilungen über Drallverteilungsmessungen [4, 5] auch zu erwarten war. Die Abweichung gegenüber der Potentialströmung hängt von der Drallstärke ab. Betrachtet man die Verteilung der Umfangskomponente  $c_u$  der Geschwindigkeit dem Radius  $r$  entlang, kann man an dieser Verteilungslinie drei charakteristische Abschnitte unterscheiden. Der erste beginnt an der Mittellinie des Rohres, zeigt eine lineare Änderung und bezeichnet einen in der Mitte des Rohres sich drehenden Kern der Strömung. Den anschließenden Abschnitt bildet eine mehr oder weniger ausgedehnte Übergangszone, während im dritten diese Geschwindigkeitskomponente hyperbolisch verläuft. Nur im letzten Bereich hat die Strömung den Charakter einer Potentialströmung, jedoch ist hier nicht  $c_u r = \text{konst.}$ , wie das beim Potentialwirbel der Fall ist, sondern hier ist  $c_u \cdot r^n = \text{konst.}$  Aus mehreren Meßreihen ergab sich, daß  $n \approx 0,7$  ist.

Die früher schon erwähnte Meßanlage ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Der Lüfter (1) saugt die Luft durch den aus verstellbaren radialen Schaufeln bestehenden Schaufelstern (2). Aus diesem tritt die Luft durch eine sorgfältig ausgeführte Abrundung in das Saugrohr (3). Das Ziel dieser Anordnung war den Strömungszustand, der im Eintrittsquerschnitt des Laufrades im Betrieb Vorhanden ist, an einer zugänglichen Stelle herzustellen. Deswegen war dem Laufrad ein gerades Rohr (4) vorgeschaltet, dessen Durchmesser mit jenem des Eintrittsquerschnittes gleich war. Der sich üblicherweise dem Eintritt des Laufrades anschließende, sogenannte »Einlauftrichter« (5) bildete hier den Übergang zwischen den beiden Saugrohren (3 und 4). Unmittelbar nach dem Austritt aus dem Übergangsstück (5) konnte man die im Radeintritt entstehende Strömung an einer zugänglichen Stelle unter-

suchen. Eine gelegentliche Rückwirkung des Laufrades kann in dieser Meßanlage natürlich nicht in Betracht genommen werden. Das Durchflußvolumen wurde mit der Hilfe einer in das Druckrohr (6) eingebauten Meßblende (11, 12) gemessen, und durch einen am Ende des Druckrohres angebrachten Drosselsack (7) geändert. Die Geschwindigkeitsverteilung wurde mit der Hilfe einer Zylindersonde mit drei Anbohrungen bestimmt (8, 9, 10). Durch die mittlere Anbohrung hindurch wurde mit ein und demselben Mikromanometer der örtliche Gesamtdruck und der statische Druck bestimmt. Bei letzterem geschah dies nach Verdrehung der Sonde auf die aus der Literatur [4] schon bekannte Weise. Aus den gemessenen Richtungs- und Druckwerten der Strömung wurde der örtliche dynamische Druck und die Geschwindigkeit

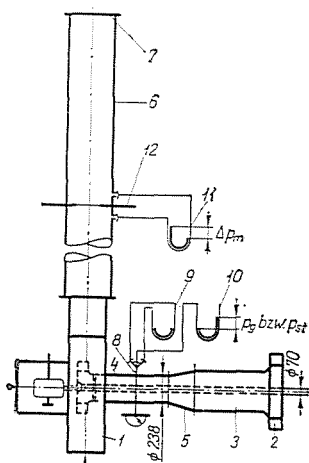


Bild 1

in üblicher Weise berechnet. In der Meßanlage wurde — den üblichen Großkesselgebläsen entsprechend — auch eine durchgehende Welle in Betracht gezogen. Sie war durch ein Rohr ersetzt.

Die Richtung und der Betrag der Geschwindigkeit wurden an zwei aufeinander senkrechten Radien an je sechs Punkten ermittelt, worauf aus den einander entsprechenden Meßwerten ein Mittelwert bestimmt wurde.

Die Messungen erwiesen, daß die Richtung der Geschwindigkeit vom Durchfluß unabhängig ist, soweit die Strömung an den Leitschaufeln (2) ablösungsfrei ist. Die ersten Meßreihen beschränkten sich also auf die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Richtungsverteilung. Die Ergebnisse sind in Bild 2 zusammengefaßt. Die Wirkung des Anstellwinkels der Leitschaufeln ist diesem gut zu entnehmen.

Zu den theoretischen Untersuchungen konnte aus diesen Meßergebnissen der Durchschnittsdrall den bereits erwähnten Gesichtspunkten entsprechend

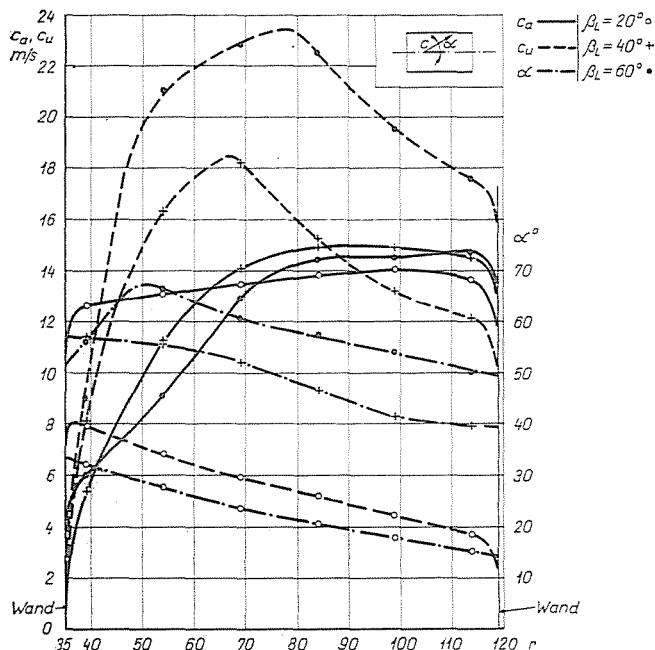


Bild 2

zu

$$\overline{r \cdot c_u} = \frac{2\pi}{Q} \int_{r_1}^{r_2} (r \cdot c_u) \cdot (r \cdot c_a) dr$$

bestimmt werden.

Außer den weiter oben schon verwendeten Bezeichnungen bedeutet hier:

$\overline{r \cdot c_u}$	den Durchschnittsdrall [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$c_a$	die axiale Komponente der Strömungsgeschwindigkeit [ $\text{m}/\text{s}$ ]
$Q$	den Durchfluß [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Daraus ergibt sich die Geschwindigkeit im Eintrittsquerschnitt der Laufradbeschaufelung — vorausgesetzt, daß der Drall unverändert bleibt —, zu

$$c_{1u} = \frac{\overline{r \cdot c_u}}{r_1},$$

worin die Indizes 1 auf die Stelle des Eintritts in das Gitter hinweisen. Daraus kann der Neigungswinkel ( $\alpha_1$ ) der Zuströmgeschwindigkeit zur Gitterachse aus dem bekannten Durchfluß bestimmt werden.

In der zweiten Meßreihe wurde das Saugrohr (4) entfernt, und so die Kennlinie [ $\psi = \psi(\varphi)$  Linie] ferner die Wirkungsgrad-Linie [ $\eta = \eta(\varphi)$  Linie]

des Gebläses bei denselben Einstellungen der Leitschaufeln experimentell bestimmt bei denen die Drallströmung in der ersten Meßreihe untersucht wurde. Es seien die üblichen dimensionslosen Kennzahlen verwendet:

die Druckzahl

$$\psi = \frac{\Delta p_{\bar{o}}}{\frac{\varrho}{2} u_2^2},$$

die Lieferzahl

$$\varphi = \frac{Q}{\frac{D_2^2 \pi}{4} u_2},$$

der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\Delta p_g \cdot Q}{L}$$

des Gebläses.

Hierin bedeuten:

$\Delta p_g$  die Gesamtdruckerhöhung des Gebläses [ $\text{kg m}^{-2}$ ],

$\varrho$  die Dichte des Mediums [ $\text{kg s}^2 \text{m}^{-4}$ ],

$u_2$  die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades [ $\text{m s}^{-1}$ ],

$D_2$  den Außendurchmesser des Laufrades [ $\text{m}$ ],

$L$  die aufgenommene Leistung [ $\text{m kg s}^{-1}$ ].

Da die gemessenen Kennlinien mit den theoretisch berechneten verglichen werden, müssen die gemessenen Werte der Druckzahl auf eine verlustlose Strömung umgerechnet werden. Bezeichnet man die umgerechneten Werte mit  $\psi_{id}$ , so gibt für diese — im ablösungsfreien Bereich der Kennlinie und bei der vorliegenden Anordnung — die Beziehung:

$$\psi_{id} \approx \frac{\psi}{\eta}$$

einen guten Näherungswert.

Die auf diese Weise aus den Meßergebnissen bestimmten  $\psi_{id} = f(\varphi)$  Linien für die verschiedenen Stellungen der Leitschaufeln ( $\beta_L$ ) sind in Bild 3 dargestellt.

In seinem theoretischen Verfahren hat HOFFMEISTER die Gleichung der idealen Kennlinie eines Lüfters in der Form

$$\frac{\psi_{id}}{\varphi^*} = \frac{l}{t} 2\pi \left( A_0 + \frac{1}{2} A_1 \right)$$

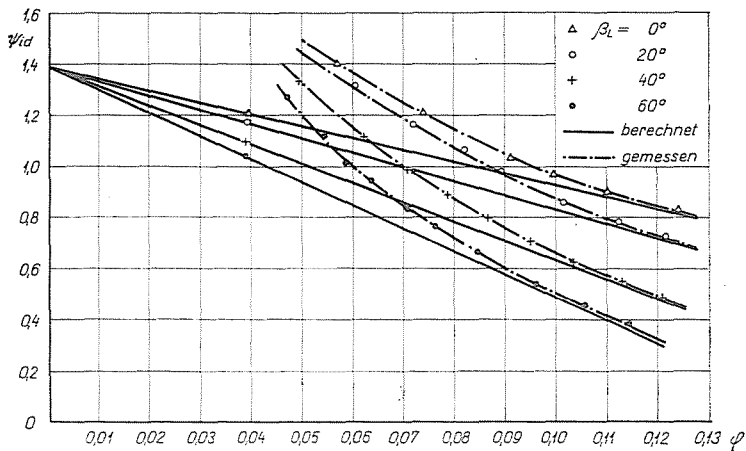


Bild 3

aufgeschrieben. Eine neuere Bestimmung der Lieferzahl ist

$$\varphi^* = \frac{Q}{D_2 \pi b_2 u_2} = \frac{D_2}{4b_2} \cdot \varphi,$$

wo  $b_2$  die Laufradbreite [m] beim Austritt bedeutet.

In der Gleichung von HOFFMEISTER ist

$$\frac{l}{t} = \frac{N}{2\pi \cos \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

ferner sind  $A_0$  und  $A_1$  für eine gegebene Beschauelung und Anströmrichtung konstante Größen.

Es bedeutet in diesen Beziehungen

$l$  die Sehnenlänge der Schaufel nach der Transformation in ein gerades Schaufelgitter,

$t$  die Teilung des geraden Gitters,

$\lambda$  den Neigungswinkel zur radialen Richtung des Bildes in der Ebene des geraden Schaufelgitters jener logarithmischen Spirale, die über den Anfangs- und Endpunkt einer Schaufel läuft,

$N$  die Schaufelzahl,

$r_2/r_1$  das Radienverhältnis der Laufradschaufeln.

Die in der Grundgleichung stehenden Koeffizienten  $A_0$ ,  $A_1$  und einen dritten  $A_2$  kann man aus folgender Gleichung bestimmen:

$$A_0 \left[ -\operatorname{tg} \beta \frac{\pi}{2} \frac{l}{t} + g_{r_0} (\operatorname{tg} \beta \sin \lambda - \cos \lambda) + f_{r_0}^* (\operatorname{tg} \beta \cos \lambda + \sin \lambda) \right] +$$

$$\begin{aligned}
& + A_1 \left[ -\operatorname{tg} \beta \frac{\pi}{4} \frac{l}{t} + g_{r_1} (\operatorname{tg} \beta \sin \lambda - \cos \lambda) + f_{r_1}^* (\operatorname{tg} \beta \cos \lambda + \sin \lambda) \right] + \\
& + A_2 [g_{r_2} (\operatorname{tg} \beta \sin \lambda - \cos \lambda) + f_{r_2}^* (\operatorname{tg} \beta \cos \lambda + \sin \lambda)] = \\
& = 1 - \operatorname{tg} \beta \left( \frac{r}{r_2} \right)^2 \frac{1}{\varphi^*} - \operatorname{tg} \beta \operatorname{ctg} a_1.
\end{aligned}$$

Es bedeutet hier

$\beta$  den Neigungswinkel der Schaufeltangente zu der auf die radiale Richtung senkrechten Richtung,

$$\begin{aligned}
f_{r_0}^* &= f_{r_0} - 1 \\
f_{r_1}^* &= f_{r_1} + \cos \psi^* \\
f_{r_2}^* &= f_{r_2} + \cos 2 \Psi^*,
\end{aligned}$$

und  $\psi^*$  kann aus Gleichung

$$\frac{x}{l} = \frac{1}{2} (1 - \cos \psi^*)$$

berechnet werden. Die Werte von  $f_{r_i}$  und  $g_{r_i}$  kann man Tabellen (3) entnehmen. Die Bezeichnungen von HOFFMEISTER wurden übernommen.

Das untersuchte Laufrad war mit Blechschaufeln versehen, die nach einer logarithmischen Spirale gebogen wurden.

Daraus folgt, daß in den vorangehenden Beziehungen  $\operatorname{tg} \beta = \operatorname{ctg} \lambda$  ist und die die  $A_i$  Koeffizienten bestimmende Gleichung in folgender Gestalt aufzuschreiben ist:

$$\begin{aligned}
& A_0 \left[ -\cos \lambda \frac{\pi}{2} \frac{l}{t} + f_{r_0}^* \right] + A_1 \left[ -\cos \lambda \frac{\pi}{4} \frac{l}{t} + f_{r_1} \right] + A_2 f_{r_2}^* = \\
& = \sin \lambda - \cos \lambda \left( \frac{r}{r_2} \right)^2 \frac{1}{\varphi^*} - \cos \lambda \operatorname{ctg} a_0.
\end{aligned}$$

Führt man — im Sinne HOFFMEISTERS — folgende Bezeichnungen:

$$\begin{aligned}
S_{0\nu} &= -\cos \lambda \frac{\pi}{2} \frac{l}{t} + f_{r_0}^* \\
S_{1\nu} &= -\cos \lambda \frac{\pi}{4} \frac{l}{t} + f_{r_1}^* \\
S_{2\nu} &= f_{r_2}^*
\end{aligned}$$

$$T_v = -\cos\lambda \left( \frac{r}{r_2} \right)^2$$

$$U = \sin\lambda - \cos\lambda \operatorname{ctg}\alpha_1$$

$$A_i = A_{i0} + \frac{1}{\varphi^*} A_{i\varphi^*}$$

ein, so kann die Grundgleichung in folgende Gleichungen aufgespalten werden:

$$\sum_{i=0}^2 A_{i0} S_{iv} = U$$

$$\sum_{i=0}^2 A_{i\varphi^*} S_{iv} = T_v$$

Bestimmt man die Werte von  $S_{iv}$  und  $T_v$  für drei Punkte der Sehne, so hat man die Möglichkeit, die Koeffizienten  $A_i$  zu berechnen.

Für das untersuchte Laufrad ist:

$$r_2/r_1 = 1,656$$

$$\beta = 38^\circ 40'$$

$$N = 6$$

$$\frac{b_2}{r_2} = 0,24$$

Aus diesen Werten ergibt sich die Gleichung der idealen Kennlinie zu:

$$\psi_{id} = \varphi^* (-2,16 + 1,73 \cdot \operatorname{ctg}\alpha_1) + 1,385.$$

Setzt man die aus den Meßergebnissen bestimmten  $\alpha_1$  Werte in diese Gleichung ein, erhält man die berechneten idealen Kennlinien. Diese sind in Bild 3 auch aufgetragen, um einen Vergleich zu erleichtern. Die  $\varphi^*$  Werte sind jedoch auf  $\varphi$  Werte umgerechnet.

Man sieht auf diesem Bild, daß die gemessenen Linien im Bereich kleiner  $\varphi$  steiler beginnen und sich den berechneten idealen Kennlinien, die natürlich gerade sind, asymptotisch nähern.

Nach dieser Feststellung wurde — wie bereits einleitend erwähnt — die Geschwindigkeits- und die Zirkulationsverteilung an den Schaufeln bei den verschiedenen Vordrallstärken untersucht. Die berechnete Geschwindigkeitsverteilung ist in Bild 4 zu sehen, worin  $w$  [m/s] die Relativgeschwindigkeit an den Schaufeln des Laufrades bedeutet. Die Zirkulationsverteilung



zeigt Bild 5. Hier bedeutet  $u_e$  die von der Einzelschaufel des geraden Gitters induzierte, zur Sehne parallele Geschwindigkeitskomponente, und  $\Delta v_k$  [m/s] wird durch die Gleichung

$$\Gamma_s = 2 l \Delta v_k$$

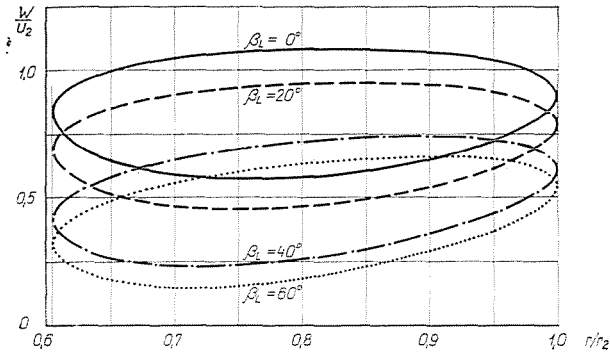


Bild 4

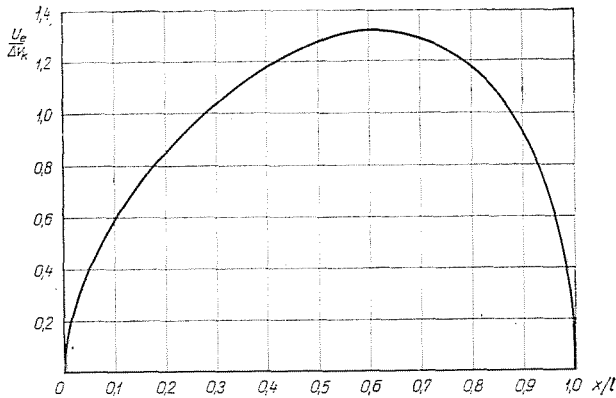


Bild 5

bestimmt, in der  $\Gamma_s$  die Schaufelzirkulation [m<sup>2</sup>/s] ist.

Von der Gleichung der idealen Kennlinie

$$\frac{\psi_{id}}{\varphi^*} = \frac{l}{t} 2\pi \left( A_0 + \frac{1}{2} A_1 \right),$$

die weiter oben bereits aufgeschrieben wurde, bewies HOFFMEISTER, daß der Punkt stoßfreien Eintrittes derselben durch die Bedingung:

$$A_0 = A_{00} + \frac{1}{\varphi^*} A_{0\varphi^*} = 0$$

bestimmt ist.

Bezeichnet man die zu diesen Punkt gehörende Lieferzahl mit  $\varphi_{opt}^*$ , so ist

$$\varphi_{opt}^* = - \frac{A_{0\varphi^*}}{A_{00}}.$$

Das Gleichungssystem, durch das die Koeffizienten  $A_i$  bestimmt sind, ergibt, daß die  $A_{i\varphi^*}$  Werte vom  $\alpha_1$  Winkel unabhängig sind, und daß für die Werte  $A_{i0}$  folgende Gleichung besteht:

$$A_{i0} = A'_{i0}(1 - \cotg \lambda \cotg \alpha_1).$$

Damit ist die Druckzahl bei  $\varphi_{opt}^*$

$$\psi_{id} = \frac{l}{t} A_1 \varphi_{opt}^* = \frac{l}{t} \pi \left( - \frac{A_{0\varphi^*} A'_{i0}}{A'_{00}} + A_{1\varphi}^* \right).$$

Diese hängt also auch nicht von  $\alpha_1$  ab. Der Wert von  $\varphi_{opt}^*$  nimmt hingegen bei zunehmenden  $\alpha_1$  Werten ab.

Diesen Feststellungen entsprechend zeigt Bild 4, daß bei zunehmenden  $\alpha_1$  Werten die Geschwindigkeiten an den Schaufeln abnehmen. Die Richtungstangente jener Geraden, die über den Geschwindigkeitswert der Eintritts- bzw. der Austrittskante der Schaufel läuft, nimmt hingegen bei unveränderten  $\psi_{id}$  und abnehmenden  $\varphi_{opt}^*$  Werten zu, wie das auch aus früheren Untersuchungen [6] hervorgeht. Der Verlauf der Zirkulationsverteilung an den Schaufeln des geraden Gitters verbleibt trotz des Abnehmens der Geschwindigkeitswerte unverändert, was sich auch aus  $\psi_{id} = \text{konst.}$  leicht ergibt. Diese Zirkulationsverteilung ist in Bild 5 dargestellt. Zusammenfassend kann man aus den Ergebnissen vorliegender Untersuchungen feststellen, daß die idealen Kennlinien eines mit Drallregler versehenen Lüfters auf theoretischem Wege — in einer mit den Meßwerten gut übereinstimmenden Weise — berechnet werden können, wenn die Geschwindigkeitsverteilung nach den Leitschaufeln des Reglers bekannt ist, und wenn aus der bekannten Drallverteilung der durchschnittliche Drall nach der hier bekanntgegebenen einfachen Beziehung bestimmt wird.

### Zusammenfassung

Auf Grund der neueren Entwicklung der Theorie kann die Leistungsänderung eines gegebenen Laufrades bei Änderung des Vordralls theoretisch — mit den Meßergebnissen gut übereinstimmend — berechnet werden. Die Strömung hinter den Leitschaufeln ist keine Potentialströmung, um jedoch die Theorie anwenden zu können, kann der Drall eines der vorhandenen Strömung gleichwertigen Potentialwirbels bestimmt werden. Die Verfasser haben aus den bei verschiedenen Leitschaufelstellungen gemessenen Drallverteilungen den Drall der gleichwertigen Wirbel bestimmt und aus diesen die Kennlinien theoretisch berechnet. Die berechneten Kennlinien stimmen mit den gemessenen gut überein. Die Geschwindigkeitsverteilungen an den Laufschaufeln bestätigen theoretische Überlegungen. Bei der Konstruktion eines Laufrades kann die Auswirkung einer Drallregelung anhand des bekanntgegebenen Verfahrens im vorhinein berechnet werden, wenn die Geschwindigkeitsverteilung hinter den Leitschaufeln bekannt ist.

### Literatur

1. HERZOG, P.: Die Regelung von Kesselventilatoren radialer Bauart (Ungarisch). Magyar Energiagazdaság, **7**, 448 (1954).
2. Die Drallregelung von Radialventilatoren (Ungarisch). Bericht des Lehrstuhls für Strömungslehre der Techn. Univ. Budapest, 1958. Beilage Nr. 5.
3. HOFFMEISTER, M.: Entwicklung der radialen Laufschaufeln unter Benutzung des Singularitätenverfahrens. Maschinenbau Technik **3**, 77 (1959).
4. SCHIEBELER, W.: Luftströmungen mit Drall im Kreisrohr hinter radialem Leitapparat. Mitteilungen aus dem Max Planck-Institut für Strömungsforschung, Nr. 12, 1955.
5. KONCZ, I.—VAJNA, Z.: Dralldiffusorversuche (Ungarisch). Themenbericht der Gasdynamischen Abteilung des Wärmetechnischen Vers. Instit. Budapest, 1959.
6. KURUTZ, I.: Die Geschwindigkeitsverteilung an der Beschau felung der radialen Laufräder bei Änderung der Konstruktionsgrößen. Periodica Polytechnica **2**, 207 (1958).

Z. VAJNA     {  
F. BENCZE    { Budapest, XI. Bertalan Lajos utca 4—6, Ungarn